

Docket No. 2000-0515A  
 Serial No. 09/722,646  
 Filed 11/28/2000



⑨ BUNDESREPUBLIK  
 DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
 PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
 ⑩ **DE 44 15 176 A 1**

⑤ Int. Cl.<sup>5</sup>:  
**H 04 B 10/18**  
 G 02 B 6/12

⑳ Aktenzeichen: P 44 15 176.4  
 ㉑ Anmeldetag: 29. 4. 94  
 ㉒ Offenlegungstag: 3. 11. 94

DE 44 15 176 A 1

③① Unionspriorität: ③② ③③ ③①  
 30.04.93 SE 9301500

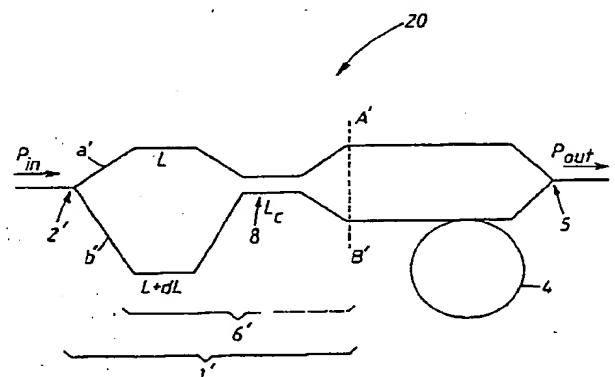
⑦① Anmelder:  
 Telefonaktiebolaget L M Ericsson, Stockholm, SE

⑦④ Vertreter:  
 Eitle, W., Dipl.-Ing.; Hoffmann, K., Dipl.-Ing.  
 Dr.rer.nat.; Lehn, W., Dipl.-Ing.; Fücksle, K.,  
 Dipl.-Ing.; Hansen, B., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.;  
 Brauns, H., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Görg, K.,  
 Dipl.-Ing.; Kohlmann, K., Dipl.-Ing.; Kolb, H.,  
 Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Ritter und Edler von  
 Fischern, B., Dipl.-Ing., Pat.-Anwälte; Nette, A.,  
 Rechtsanw.; Kindler, M., Dipl.-Chem.Univ.  
 Dr.rer.nat.; Zangs, R., Dipl.-Ing., Pat.-Anwälte, 81925  
 München

⑦② Erfinder:  
 Djupsjöbacka, Anders Gustav, Solna, SE; Sahlén,  
 Olof Göran, Solna, SE

⑤④ Vorrichtung und Verfahren zur Dispersionskompensation in einem faseroptischen Übertragungssystem

⑤⑦ Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung (20) bzw. ein Verfahren zur Dispersionskompensation in einem faseroptischen Übertragungssystem, in dem ein optisches Signal ( $P_{in}$ ) eingespeist wird an die Vorrichtung. Somit umfaßt die Vorrichtung eine optische Separationsvorrichtung (1') zum spektralen optischen Splitten des optischen Eingangssignals ( $P_{in}$ ) in zwei Äste eines oberen und eines unteren Modulations-Seitenbandes, eine Verzögerungsvorrichtung (4) zur selektiven Verzögerung der spektralen Bänder in bezug aufeinander und eine Kombinationsvorrichtung (5') zum Kombinieren der Seitenbänder.



DE 44 15 176 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 09. 94 408 044/532

16/32

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein System und ein Verfahren jeweils zur Dispersionskompensation in einem faseroptischen Hochgeschwindigkeits-System in Übereinstimmung mit dem Oberbegriff des Anspruchs 1 bzw. des Anspruchs 22. Faseroptische Übertragungssysteme oder insbesondere faseroptische Hochgeschwindigkeits-Systeme werden benutzt bei einer Kommunikation auf verschiedene Art und Weise, wie z. B. bei der Telekommunikation und über lange Übertragungsentfernungen. Bestimmte Netzwerke, wie z. B. nationale Netzwerke, erfordern sehr hohe Übertragungsgeschwindigkeiten, oft 2,5 Gbit/s, aber die Übertragungsgeschwindigkeit kann ebenfalls beträchtlich höher sein, z. B. 10 Gbit/s und darüber. Die Übertragungsgeschwindigkeit ist jedoch begrenzt durch das Auftreten einer Dispersion zwischen Sender und Empfänger. Die Dispersion beginnt Probleme zu machen bei etwa 2,5 Gbit/s. Bei 10 Gbit/s gibt sie Anlaß zu einer beträchtlichen Begrenzung aufgrund der Tatsache, daß die Informationsbandbreite selbst Anlaß zur Dispersion gibt. Probleme mit Dispersion treten somit auf bei hohen Geschwindigkeiten und langen Abständen. Bei gewöhnlichen Einzelmode-Fasern steigt die Signifikanz der Dispersion bei Bitraten höher als 2,5 Gbit/s für Wellenlängen von etwa 1,55  $\mu\text{m}$ . Bei oft benutzten Verstärkerabständen von etwa 60 Kilometern ist der Effekt signifikant bei 10 Gbit/s. Somit ist es von großer Bedeutung, daß die Dispersion soweit wie möglich begrenzt ist, um so lange Übertragungsentfernungen wie möglich zu erzielen.

Eine Anzahl von Vorrichtungen bzw. Verfahren zur Kompensation der Dispersion in faseroptischen Übertragungssystemen, insbesondere Hochgeschwindigkeits-Systemen wurde vorgeschlagen.

Eine Anzahl bekannter Lösungen basieren auf der sogenannten Vorzirk-Technologie. Diese basiert auf der Tatsache, daß die Frequenz/Wellenlänge des Lasers während jedes Impulses moduliert wird. Das Frequenzspektrum ist auf solch eine Art und Weise verzerrt, daß der Impuls in der Faser konvergiert. Sowohl direkt als auch extern modulierte Systeme sind bekannt, und gewöhnlicherweise erzielt der Laser den Vorzirk-Effekt in beiden Fällen. Ein Beispiel solch einer Vorrichtung ist beispielsweise beschrieben in "Dispersionskompensation durch aktive Synthese vorverzerrter Signale", T.L. Koch, R.C. Alfiness, J. of Lightwave Technology, Band LT-3, Nr. 4, (1985), Seiten 800—805. Bei 1,05  $\mu\text{m}$  und für eine gewöhnliche Einzelmode-Faser ist es erforderlich, daß das Signal blauverschoben werden soll. Durch direkte Modulation rotverschiebt sich ein Laser normalerweise während des Impulses. Gewöhnlicherweise wird der Laser FM-moduliert zum Erhalten des Zirpens, wonach die AM-Modulation angewendet wird mittels eines externen Modulators. Bei beispielsweise "10 Gb/s 100-km Normalfaser-Übertragungsexperiment unter Verwendung einer modifizierten Vorzirk-Technik", N. Henmi, T. Saito, M. Yagamushi, S. Fujita, Proc: OFC'91, (1991), Artikel Tu02, ist beschrieben, wie selektierte DFB-Laser benutzt werden. Bei einer sogenannten Blauverschiebungs-Modulation in dem Sender, siehe beispielsweise "Frequenz-Zirpen bei externen Modulatoren", F. Koyoma, K. Iga, J. of Lightwave Technology, Band LT-6) Nr. 1, (1988), Seiten 87—93, wird das FM/AM-modulierte Signal erhalten in einem externen Modulator, wodurch der Laser ohne jeglichen Einfluß funktioniert. Um die erforderliche Modulation zu erhalten, ist es normalerweise erforderlich, daß der externe Modulator auf spezielle Art und Weise entworfen ist. Sowohl in dem Fall, in dem der Laser die Vorzirk-Funktion ausführt, als auch in dem Fall, in dem ein externer Modulator die Vorzirk-Funktion ausführt, gibt es einen Wunsch, einen blauverschobenen Impuls zu erhalten. Sowohl die Vorzirk-Erzeugung als auch die Blauverschiebungs-Modulation in dem Sender benutzen die Dispersion zum Erzielen einer Impulskompression.

Mittels einer weiteren bekannten Vorrichtung wird die Übertragung dispersionsfrei gemacht durch Hinzufügen einer zusätzlichen Länge der Faser, was ein umgedrehtes Zeichen der Dispersion hat, und dies ist beispielsweise beschrieben in "Vielfachwellenlängen-Dispersionskompensation für 1550 nm Übertragung bei 2,5 Gb/s über 1310 nm optimierte Einzelmodefaser", H. Izadpanah, C. Lin, K. Runge, M.Z. Iqbal, J.L. Gimlett, Proc: ECOC'92, (1992), Artikel TuA5.1. Eine Vorrichtung, in der eine bereits entworfene Faser benutzt wird, bedeutet, daß eine dispersionskompensierende Faser vor dem Empfänger angeordnet werden kann. Die Kompensations-Faserlänge kann etwa ein Drittel von der Übertragungsdistanz sein. Dies gibt eine Anzahl von Nachteilen aufgrund der Tatsache, daß die Extrafaser oder Faserlänge teuer ist, sie ein spezielles Design verlangt und sie ebenfalls eine Abschwächung hinzufügt. Bei dem obenerwähnten Dokument sind die Verluste begrenzt durch Anordnen eines Faserverstärkers zwischen der Übertragungsfaser und der Dispersionskompensations-Faser, was das System weiterhin kompliziert und es deshalb teurer macht.

Eine Anzahl von Vorrichtungen sind ebenfalls bekannt, durch die die Dispersionskompensation des Signal ausgeführt wird auf der Empfangsseite des Übertragungssystems. Ein Beispiel ist beschrieben in "Mikrostreifen-Kompensation faserchromatischer Dispersion in optischverstärkten kohärenten Systemen" J.J. O'Reilly, M.S. Chauldry, Proc: EII-Colloquium on Microwave Optoelectronics, Nr. 139, (1990), Seiten 13/1—13/6. Diese Vorrichtung basiert auf einer optischen Phasenkompensation des Frequenzspektrums des empfangenen Signals, was der Phasendifferenz, welche die verschiedenen Teilfrequenzen in der entworfenen optischen Faser empfangen haben, entgegenwirkt. Diese Vorrichtung erfordert, genauso wie andere derselben Art, die Benutzung einer heterodynen Technologie in dem Empfänger. Jedoch ist dies eine komplexe und teure Technik. In dem beschriebenen Dokument wird die Phasenverzerrung behandelt bei einer Zwischenfrequenz. Ein Mischer ist vorgesehen, welcher aus einem optischen Richtungskoppler besteht, der gefüttert wird mit einem Signal, und einem lokalen Oszillator, einer Detektordiode und einem Bandpaßfilter, und welcher nur die Differenzfrequenz durchläßt. Das Phasenkorrektur-Element ist gebildet durch einen Mikrostreifenleiter mit einer normalen Dispersion. Der Mikrostreifenleiter kann beispielsweise 10—20 cm lang sein und kompensiert die Dispersion in einer Faser einer Kopplung von hundert Kilometern. Danach wird das elektrische Signal auf normale Art und Weise erfaßt.

Die EP-A-0 256 809 beschreibt eine Vorrichtung zur Dispersionskompensation, welche auf einer Multimode-Struktur als Dispersionskompensations-Element basiert. Das Signal wird geteilt in eine Anzahl partieller Wellenlängen, welche dann propagieren können über Distanzen gleicher Längen, aber mit verschiedener Gruppen-

geschwindigkeit. Für digitale Kommunikationssysteme im Gbit/s-Bereich kann die relative Verzögerungszeit in der Größenordnung von 100 ps sein. Eine Zeitdifferenz dieser Größe ist schwer auszuführen mit Konzepten, welche auf der Tatsache basieren, daß die partiellen Wellenlängen dieselbe Distanz zurücklegen sollen, aber mit verschiedenen Gruppengeschwindigkeiten, wobei die Verluste dabei Anlaß ernsthafter Probleme geben. Weiterhin ist eine Vorrichtung dieser Art nicht flexibel.

Die EP-A-0 0464812 beschreibt eine Vorrichtung, in der eine Faser dispersionsfrei gemacht ist durch Verbinden einer Anzahl von Elementen mit entgegengesetzten Zeichen der Dispersion für eine vorgegebene Wellenlänge. Das Signal wird aufgespalten in verschiedene partielle Wellenlängen, welche verschiedene Distanzen im Raum propagieren können, und durch die Benutzung eines Gitters wird eine Anzahl von Wellenlängen erhalten. Diese Vorrichtung basiert auf einer sogenannten "Frei-Raum"-Kommunikation, was bedeutet, daß keine Wellenleiter existieren, und die Differenz im Abstand sollte etwa 3 cm sein, um eine Zeitdifferenz von etwa 100 ps zu erzielen. Sogar falls die Differenz in der Distanz selbst erhalten werden kann durch die Vorrichtung, wird sie empfindlich sein gegenüber Interferenz und schlecht geeignet sein für groß-skalige Produktion. Deshalb leidet die Vorrichtung unter mangelnder Stabilität.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Vorrichtung bzw. ein Verfahren zu definieren, um soweit wie möglich den Einfluß von Dispersion in faseroptischen Übertragungssystemen, insbesondere Hochgeschwindigkeits-Systemen, wie definiert in dem Oberbegriff von Anspruch 1 bzw. 22, zu eliminieren. Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es somit, die Übertragungsdistanz in dispersionsbegrenzten Systemen zu verlängern. Weiterhin ist es Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung bzw. ein Verfahren zu definieren, welches billig und einfach zu produzieren und gut geeignet für groß-skalige Produktion ist. Eine weitere Aufgabe ist es, daß die Vorrichtung eine Stabilität haben sollte und daß sie geeignet sein sollte zur Produktion als ein Hybrid sowie eine integrierte Schaltung. Eine besondere Aufgabe ist es, eine Vorrichtung bzw. ein Verfahren für Übertragungsgeschwindigkeiten von 10 Gb/s und mehr zu definieren. Weiterhin sollte die Vorrichtung große Flexibilität in Zusammenhang mit dem Design der Dispersionskompensations-Vorrichtung aufweisen, und Verzögerungsabstände verschiedener Längen sollten leicht erhaltbar sein, und sie sollte eine Möglichkeit anbieten zum Vorsehen optischer Verstärker in dem Signalweg. Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Vorrichtung bzw. ein Verfahren zu definieren, durch welche sehr lange Übertragungsdistanzen sowie sehr hohe Übertragungs-Geschwindigkeiten möglich sind. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, daß die Kompensation der Dispersion ausgeführt werden kann an der Empfangsseite ohne die Notwendigkeit, heterodyne Technologie zu benutzen. Es ist ebenfalls eine Aufgabe, daß die Vorrichtung irgendwo angeordnet sein kann in der Transferkette des Übertragungssystems.

Eine Vorrichtung, durch die diese sowie andere Aufgaben gelöst werden, ist beschrieben durch eine Vorrichtung, wie definiert im kennzeichnenden Teil von Anspruch 1.

Ein Verfahren, durch welches die obigen Aufgaben gelöst werden, ist beschrieben durch ein Verfahren, wie definiert im kennzeichnenden Teil von Anspruch 22.

Bevorzugte und alternative Ausführungsformen sind definiert durch die Merkmale, welche in den abhängigen Ansprüchen beschrieben sind.

Falls bei einem Übertragungssystem die Übertragung ausgeführt wird in einem Format resultierend in Doppelseitenbändern um die Trägerwelle, wird die Dispersion zu den Frequenzen im Empfangssignal-Spektrum führen, welche um verschiedene Beträge verzögert sind in bezug aufeinander. Das sogenannte blaue Seitenband wird eine kürzere Zeit verzögert sein als das rote Seitenband. Durch optisches Filtern werden die zwei Seitenbänder voneinander getrennt werden, so daß das blaue Seitenband verzögert ist in bezug auf das rote, bevor sie verbunden werden auf geeignete Art und Weise bezüglich der Phase. Darauf können sie gemäß einer Ausführungsform erfaßt werden in einer an sich bekannten Art und Weise.

Ein Maß, um wieviel das Signal verzerrt ist, kann erhalten werden durch Berechnen eines gerechneten RMS-Werts der Phasendifferenz im Intervall, in dem Signalleistung vorliegt.

$$RMS = 2 \sqrt{\frac{\int_0^{\omega_{c1}} P(\omega) (\Delta\phi)^2 d\omega}{\omega_{c1}}} = \frac{2 D_2 L}{\sqrt{\omega_{c1}}} \sqrt{\int_0^{\omega_{c1}} P(\omega) (\omega^2 - C \omega \omega_{c1})^2 d\omega}$$

Hier definiert  $P(\omega)$  das Leistungsspektrum des Signals.  $\omega_{c1}$  bezeichnet die Winkelfrequenz für den Systemzeit-takt, welche weiterhin proportional ist zur Bitrate,  $B$  bezeichnet die Bitrate,  $L$  bezeichnet die Übertragungsdistanz,  $\Delta L$  ist die Distanz in der Verzögerungsschleife im Empfänger, welche proportional ist zum Dispersionsparameter in der Faser  $D_2$ , und  $v_g$  bezeichnet die Gruppengeschwindigkeit in dem Verzögerungsmedium.  $C$  ist dimensionslos und sollte so gewählt werden, daß der RMS-Wert minimalisiert ist, was äquivalent ist zum Minimalisieren des Integrals in der obenerwähnten Gleichung. In der Gleichung gibt es ein Minuszeichen vor  $C$ , und zwar aufgrund der Tatsache, daß, falls ein Signal um eine positive Distanz verzögert ist, es "zurückgelassen werden wird" bezüglich der Phase. Der Einfachheit halber ist die Gewichtsfunktion  $P(\omega) = 1$  gesetzt. Die Frequenzskala wird so übersetzt, daß die Trägerwelle 0 in der Winkelfrequenz hat, und die Zeitskala ist so gewählt, daß eine Nullphasen-Differenz für die Trägerwelle erhalten wird. Weiterhin ist die Verzögerung so gewählt, daß das "rote" Seitenband verzögert ist um die Distanz  $-C \cdot \omega_{c1} D_2 L v_g / 2$ , wohingegen das "blaue" Seitenband verzögert ist um die Distanz  $C \cdot \omega_{c1} D_2 L v_g / 2$ . Auf diese Art und Weise wird die Symmetrie benutzt, und zweimal der RMS-Wert berechnet. Berechnungen geben die RMS-Werte für das halbe Integral mit oder

ohne Kompensation an. Ohne Kompensation wird ein RMS-Wert von

$$RMS = \frac{2D_2L}{\sqrt{5}} \omega_{cl}^2 = K \cdot D_2LB^2$$

erhalten, wohingegen der RMS-Wert mit Kompensation gegeben ist durch

$$RMS = \frac{D_2L}{2\sqrt{5}} \omega_{cl}^2 = \frac{K}{4} \cdot D_2LB^2.$$

In Übereinstimmung mit dem Kompensations-Algorithmus, der oben beschrieben ist, kann die Übertragungsdistanz maximal mit einem Faktor 4 in bezug auf einen nicht kompensierten Fall ansteigen. Die optimale Verzögerungsdistanz kann ausgedrückt werden als

$$\Delta L = C\omega_{cl}D_2Lv_g.$$

Die Erfindung wird im folgenden detaillierter beschrieben werden mit Bezug auf die begleitende Zeichnung, und zwar zu erklärendem und keineswegs begrenzenden Zweck.

Die Figuren zeigen im einzelnen:

Fig. 1 im allgemeinen eine erste Ausführungsform der Erfindung, in der die Separationsvorrichtung aus einem Splitter und zwei Filtern besteht;

Fig. 2 ein Leistungsspektrum für das modulierte optische Signal und eine Filtercharakteristik für den Fabry-Perot-Filter der Vorrichtung in Übereinstimmung mit Fig. 1;

Fig. 3 die "Leistungsstrafe" als eine Funktion des Abstandes mit und ohne Dispersionskompensation der Vorrichtung in Übereinstimmung mit Fig. 1;

Fig. 4 eine alternative Ausführungsform der Vorrichtung, wobei die Separationsvorrichtung einen Splitter, eine Vorrichtung zum Sortieren von Wellenlängen und einen Richtungskoppler umfaßt;

Fig. 5 ein Leistungsspektrum für das modulierte Signal in Übereinstimmung mit Fig. 4 und die Transferfunktion für die zwei Äste des Mach-Zender-Interferometers, und

Fig. 6 einen Vergleich der Übertragungsdistanz für verschiedene Werte von C.

In fiberoptischen Systemen wird Dispersion in Form von Phasenverzerrung zweiter Ordnung normalerweise in Betracht gezogen. Phasenverzerrung dritter Ordnung ist nur signifikant in Ultra-Hochgeschwindigkeits-Systemen, d. h. über 40 Gbit/s, und dann nur in den Fällen, in denen man sehr nahe der dispersionsfreien Wellenlänge in der Faser ist. Andererseits ist es die Phasenverzerrung der zweiten Ordnung, welche der dominante Parameter für die Dispersion in der Faser ist.

Im allgemeinen basiert die Erfindung auf der Tatsache, daß eine Spektralzeit-Kompensation ausgeführt wird im Empfänger oder sonstwo in der Übertragungskette des Systems (falls das System linear ist). Das durch die Vorrichtung empfangene Signal wird aufgeteilt in zwei Spektralhälften. Diese werden verzögert in Bezug aufeinander durch Zulassen, daß sie Distanzen verschiedener Längen in zwei separaten Einzelmode-Wellenleitern propagieren, aber mit im wesentlichen derselben Gruppengeschwindigkeit, d. h. eine selektive Zeitverzögerung wird erzielt. Die Gruppengeschwindigkeiten für die Modulations-Seitenbänder sind im wesentlichen dieselben, d. h. es ist erwünscht, daß sie dieselben sind, aber natürlicherweise können sie leicht oder insignifikant voneinander differieren aufgrund der Tatsache, daß diese Wellenleiter ebenfalls eine Dispersion haben. Weiterhin werden Einzelmode-Wellenleiter und Einzelmode-Technologie benutzt.

In Fig. 1 ist eine erste Ausführungsform der Vorrichtung illustriert. Die Vorrichtung 10 zur Dispersionskompensation ist in diesem Fall angeordnet auf der Empfangsseite in einem faseroptischen Übertragungssystem. In Übereinstimmung mit der Erfindung gibt es keine Notwendigkeit, heterodyne Technologie anzuwenden. Ein einkommendes optisches Signal  $P_{in}$  wird eingespeist an eine Separationsvorrichtung 1, welche einen Splitter 2 umfaßt, welcher beispielsweise gebildet ist durch einen passiven 3-dB-Koppler. Es wird dann aufgespalten in zwei Äste a, b, in jedem derer ein optischer Bandpaßfilter 3a, 3b angeordnet ist, welcher jeweils ein Seitenband des modulierten Signals herausfiltert. In dem illustrierten Abschnitt A-B wird eine spektral-ausgeschnittene Untermenge des totalen Spektrums demzufolge erhalten. Die optischen Bandpaßfilter 3a, 3b können beispielsweise gebildet sein durch sogenannte Fabry-Perot-Filter. Das Seitenband, welches propagiert ist mit dem kleinsten Verzögerungsbetrag in der Faser, wird dann verzögert in einer Verzögerungsvorrichtung 4, welche im gezeigten Beispiel gebildet ist durch eine Verzögerungsleitung. Die Signale werden dann kombiniert in den zwei Ästen a, b zu einer gemeinsamen Ausgabe, und zwar in einer Kombinationsvorrichtung 5. Die Signalkombination ist kohärent, was normalerweise eine aktive Steuerung einer Phase in einem der Äste impliziert. Um diese Phasensteuerung zu erzielen, können beispielsweise die elektro-optische Leistung in einem Phasenmodulator, Temperatursteuerung oder einige andere bekannte Verfahren (nicht gezeigt) benutzt werden. Daraufhin kann das Signal erfaßt werden durch eine Erfassungsvorrichtung (nicht gezeigt) auf eine bekannte Art und Weise. In Übereinstimmung mit dem in Fig. 1 illustrierten Beispiel ist die Vorrichtung auf der Empfangsseite angeordnet. Dies ist jedoch nicht notwendig, da, falls das System linear ist, es prinzipiell irgendwo in der Übertragungskette angeordnet sein kann. Die Erfassungsvorrichtung ist normalerweise geeignet, nur auf der Empfangsseite angeordnet zu werden.

In Fig. 2 ist das Leistungsspektrum für das modulierte optische Signal für eine mögliche Ausführungsform illustriert. In diesem Zusammenhang kann der Sender beispielsweise bestehen aus einer Laserdiode, deren Licht intensitätsmoduliert ist durch einen Absorptionsmodulator mit einem Aus-Fading von etwa 9 dB und ohne Zirpen.  $P_{in}$  kann ebenfalls ein 10-Gb/s-Pseudo-Zufallswort genannt werden. Das elektrische Signal muß elektrisch gefiltert werden durch eine RC-Verbindung mit einer Anstiegszeit von 25 ps. Weiterhin wurde das Signal übertragen auf einer standardisierten nicht dispersionsverschobenen Faser mit 16-ps/nm/km-Dispersion. Die Filter in dem gezeigten Beispiel, sogenannte Fabry-Perot-Interferometer mit einer Bandbreite von 10 GHz, sind eingestellt zum Ausfiltern der oberen und unteren Seitenbänder. Die Feinheit der Filter F ist in der illustrierten Ausführungsform gleich 192 mit einer Ordinalzahl M, welche gleich 100 ist, und einer Spiegelreflektanz R von 98,4%. Die Verzögerungszeit T ist optimiert für jede Faserlänge zum Erhalten einer vernachlässigbaren Leistungsstrafe. In der Figur ist das Spektrum so übersetzt, daß die Frequenz der optischen Trägerwelle transferiert ist auf den Ursprung der Koordinaten, und zwar der Klarheit halber. In Fig. 2 ist das übertragene optische Leistungsspektrum gezeigt, in dem die Transferfunktion, d. h. die Filtercharakteristika, für die Fabry-Perot-Filter markiert sind. Die spezifizierten Werte zeigen nur Beispiele einer Ausführungsform, welche selbstverständlich auf einer Anzahl von Arten variieren können.

In Fig. 3 sind Werte der "Leistungsstrafe" illustriert als eine Funktion der Länge der Übertragungsfasern mit und ohne Dispersionskompensation in Übereinstimmung mit dem Beispiel von Fig. 1. In diesem Zusammenhang illustriert eine unterbrochene Linie den Fall mit einer Dispersionskompensation, während eine kontinuierliche Linie den Fall ohne Dispersionskompensation illustriert. Die Verzögerungszeiten T im Fall mit Dispersionskompensation variieren innerhalb des Intervalls von 25 ps (Faser von 50 Kilometern) bis 100 (Faser von 200 Kilometern). In der Figur ist nur die Leistungsstrafe, die verursacht wird durch die Dispersion und durch Beschränkungen in der Bandbreite in dem Sender, gezeigt, wohingegen ein Einfluß einer Abschwächung in der Faser und Rauschen von der Empfangsschaltung sowie jeglicher möglicher optischer Verstärker nicht berücksichtigt sind. Wie klar ist, kann der Übertragungsabstand, der definiert ist als die Länge der Faser, für die eine 3-dB-Leistungsstrafe erhalten wird, erhöht sein um einen Faktor von etwa 2,3, wobei dies jedoch nur ein Beispiel für eine gewisse Vorrichtung darstellt.

Wie oben erwähnt, kann z. B. ein faseroptischer 3-dB-Splitter benutzt werden sowie zwei Fabry-Perot-Filter und eine optische Verzögerungsleitung 4. Dieser kann bei einer Länge von 2 cm eine Verzögerungszeit T von 100 ps haben. Dies wird jedoch nur festgestellt zum Zweck eines Beispiels, und eine Anzahl anderer Lösungen sind selbstverständlich möglich. Um eine aktive Phasensteuerung in einem der Äste zu erhalten, welche oben erwähnt worden ist, kann eine der Fasern beispielsweise geheizt werden vor dem Koppler 5, aber in Übereinstimmung mit einer alternativen Ausführungsform ist es ebenfalls möglich, sie einem mechanischen Druck auszusetzen. In beiden Fällen können kleine aber hinreichende Änderungen des Brechungsindex erzielt werden, um ein kohärentes Kombinieren der Signale in der Kombinationsvorrichtung zu erhalten. In Übereinstimmung mit einer weiteren Ausführungsform ist es möglich, einen elektro-optischen Phasenkompensator in einem der Äste (nicht gezeigt) anzuordnen.

Es wurde im Obigen angenommen, daß alle beinhalteten Komponenten unabhängig von der Polarisierung sind. Jedoch ist dies nicht unbedingt so; falls eine Polarisations-Abhängigkeit vorliegt, muß jedoch eine Art von Polarisations-Steuerung an der Eingangsseite ausgeführt werden.

In Übereinstimmung mit einer alternativen Ausführungsform für diskrete Komponenten kann die gesamte Vorrichtung integriert sein auf einem halbleitenden Substrat, welches beispielsweise gebildet sein kann durch GaAs oder InP. InP kann beispielsweise geeignet sein, falls die Komponente benutzt werden sollte bei einer Wellenlänge von etwa 1550 nm. In diesen Fällen bestehen die Wellenleiter aus Einzelmode-Wellenleitern, hergestellt durch herkömmliche Epitaxi- und Ätzverfahren. Bei monolithischer Integration auf Halbleitern können beispielsweise Resonanzlaser-Verstärkerfilter, DFB- oder DBR-Laser, welche als Engband-Verstärkungsfilter arbeiten, als Filter benutzt werden. Da InP-Wellenleiter einen größeren Brechungsindex haben als Glasfaser, werden die Verzögerungslängen in der Verzögerungsvorrichtung 4 kleiner werden, beispielsweise in einem Fall entsprechend dem obenerwähnten mit einer Verzögerungszeit von etwa  $T = 100$  ps würde die Distanz etwa 0,9 cm werden.

Bei einer monolithisch integrierten Vorrichtung kann die Erfassungsvorrichtung ebenfalls monolithisch integriert sein, wie ebenfalls elektrische Verstärker in Form von Transistoren. Weiterhin kann eine Phasensteuerung durchgeführt werden durch Einführen eines kurzen Abschnitts von beispielsweise einigen Zehnteln eines Millimeters, welcher vorwärts oder rückwärts vorgespannt ist zum Erhalten einer präzisen Steuerung des Brechungsindex. In Übereinstimmung mit einer weiteren alternativen Ausführungsform ist es möglich, einen optisch verstärkenden Abschnitt an der Eingangsseite in Form eines Laserverstärkers zu integrieren. Die beschriebene Vorrichtung kann ebenfalls erzeugt werden in der Form von Einzelmode-Wellenleitern aus Materialien wie z. B. Polymeren oder Siliziumdioxid. Weiterhin ist es nicht notwendig, daß die eingeschlossenen Filter 3a, 3b aus Fabry-Perot-Filtern bestehen oder im Fall mit monolithischer Integration aus Laser-Verstärkerfiltern, sondern jeglicher Filter kann benutzt werden, vorausgesetzt, daß seine Transferfunktion hinreichend eng ist.

In Fig. 4 ist eine alternative Ausführungsform der Erfindung illustriert, bei der die Separationsvorrichtung 1' einen Splitter und eine Wellenlängen-Sortiervorrichtung 6 umfaßt.

Ein Vorteil dieser Ausführungsform ist, daß im wesentlichen alles Licht benutzt werden kann, so daß ein Teil davon nicht verloren wird durch das Splitten an der Eingangsseite mit einem folgenden Ausfiltern in dem jeweiligen Ast. In der Vorrichtung 20, welche in Fig. 4 illustriert ist, wird das einkommende optische Signal  $P_{in}$  aufgeteilt in zwei Äste  $a'$ ,  $b'$ , welche von verschiedener Länge L;  $L + dL$  sind. Daraufhin wird das Licht kombiniert in einem Richtungskoppler 8, welcher eine Länge haben kann, die beispielsweise eine halbe Koppellänge beträgt. In Übereinstimmung mit einer Ausführungsform bilden die zwei Äste  $a'$ ,  $b'$  zusammen mit dem Richtungskoppler ein sogenanntes Mach-Zender-Interferometer, welches ein periodisches "Sortieren" der

Wellenlängen durchführt, so daß die Hälfte aller einkommenden Wellenlängen in dem oberen Ast  $a'$  auftritt, wohingegen eine Hälfte in dem unteren Ast  $b'$  auftritt, wie gemessen im Abschnitt  $A'-B'$ . Mittels einer geeigneten Auswahl von  $dL$ , d. h. dem, welches der Differenz in der Länge zwischen den zwei Ästen entspricht, wird eine Periodizität erhalten, welche eines der Modulations-Seitenbänder im wesentlichen in " $a$ " plaziert, während das andere Modulations-Seitenband im wesentlichen in " $b$ " plaziert. In einer Art und Weise, welche analog ist zur in Fig. 1 beschriebenen Ausführungsform wird das Seitenband, welches verzögert ist mit dem geringsten Betrag in der Übertragungsfaser, verzögert in einer analogen Weise in der Verzögerungsvorrichtung 4, wonach die zwei Signale kombiniert werden in der Kombinationsvorrichtung 5, welche ein Richtungskoppler sein kann. Ebenfalls in diesem Fall wird eine aktive Steuerung durchgeführt unmittelbar vor der Kombinationsvorrichtung 5 oder dem Richtungskoppler, und zwar zum Erhalten einer kohärenten Kombination der Signale. Der Richtungskoppler hat eine symmetrische Ausgabe.

In Übereinstimmung mit einer Ausführungsform besteht die in Fig. 4 beschriebene Vorrichtung 20 aus diskreten Faserkomponenten, wie z. B. einem Fasersplitter 2', einem Faserkoppler 8, einer Verzögerungsvorrichtung 4 (insbesondere in Form einer Verzögerungsleitung) sowie einer Phasensteuerung (nicht gezeigt).

In Übereinstimmung mit einer weiteren Ausführungsform kann die Vorrichtung 20 der einen in Fig. 4 beschriebenen entsprechen, aber kann erzeugt sein durch monolithische Integration auf einem halbleitenden Substrat, wie z. B. GaAs oder InP, oder kann integriert sein in Polymeren oder Siliziumdioxid in Analogie zu dem, was mit Bezug auf Fig. 1 beschrieben worden ist.

Die Separationsvorrichtung 1' muß nicht aus einem Splitter 2' und einem Mach-Zender-Interferometer bestehen, sondern anstatt des Mach-Zender-Interferometers kann jegliche andere geeignete Art von wellenlängen-sortierender Vorrichtung benutzt werden. Die wellenlängen-sortierende Vorrichtung kann beispielsweise auf einem Gitter basieren.

Fig. 5 zeigt ein Leistungsspektrum für das modulierte Lichtsignal und die Transferfunktionen für den oberen bzw. unteren Ast im Abschnitt  $A'-B'$  in Fig. 4, und zwar analog mit Fig. 2. Somit sind die Transferfunktionen gezeigt für in diesem Fall die zwei Äste des Mach-Zender-Interferometers.

Im folgenden ist ein Beispiel gezeigt, in dem der Empfänger als Ideal angenommen wird. Es wird weiterhin angenommen, daß die Faser eine gewöhnliche Einzelmode-Faser ist mit einer Dispersion von 17 ps/nm/km, und die Bitrate wird angenommen zu 10 Gbit/s, wohingegen die Wellenlänge auf 1,55  $\mu\text{m}$  eingestellt ist.

Als Modulationsformat wurde NRZ (Non Return to Zero = keine Rückkehr zu Null) gewählt, und zwar mit einer Impulsform entsprechend einem Cosinus mit dem Exponenten 2. In diesem Zusammenhang wird angenommen, daß die Signalleistung vorliegt bis zu 0,7mal der Zeittaktfrequenz.

In Fig. 6 ist die Leistungsstraft (optische Leistungsstraft) als eine Funktion des Übertragungsabstands  $L$  für drei verschiedene Fälle gezeigt; mit Kompensation, was einer gestrichelten Linie entspricht, mit einem blauverschobenen Impuls, was einer gepunkteten Linie entspricht, und eine Kombination in Übereinstimmung mit der Erfindung mit verschiedenen Werten von  $C$ , was mit kontinuierlichen Linien illustriert ist. Aus dem Diagramm wird klar, daß eine maximale Dispersionskompensation erhalten wird für Werte von  $C$  von etwa 0,5. Unter diesen Annahmen würde die maximale Übertragungsdistanz etwa 3,6mal unkompensierte Übertragungsdistanz betragen. Die Tatsache, daß die Übertragungsdistanz nicht einen Faktor 4 beträgt, kann u. a. dadurch erklärt werden, daß das angenommene Signal ein nichtideales Leistungsspektrum hat, d. h. die Gewichtsfunktion für das Leistungsspektrum in Wirklichkeit nicht 1 ist. Der Übertragungsabstand hängt somit ab vom Signalspektrum, und bei einem idealen Signalspektrum würde ein Faktor 4 im verzögerten Übertragungsabstand möglich sein. Bei einem Wert von  $C$  von etwa 0,5 bis 0,6 würden verlängerte Übertragungsabstände von etwa 3 bis 3,5 möglich sein, aber dies sind nur Beispiele von Werten für diesen beschriebenen Fall.

Die obengezeigten Vorrichtungen und die jeweiligen Verfahren werden benützt zur Kompensation der Dispersion in optischen Übertragungssystemen mit hohen Bitraten, worin die Dispersion andererseits einen Begrenzungsfaktor bezüglich der Übertragungsdistanzen, welche möglich sind ohne eine elektro-optische Regeneration, darstellt. Theoretisch können mit den in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung beschriebenen Vorrichtungen die Übertragungsabstände aufgeweitet werden auf einen Faktor 4. Der Betrag der Aufweitung der Übertragungsabstände, d. h. wie nahe man dem Faktor 4 kommen kann, hängt u. a. davon ab, wie scharfe optische Faser oder Wellenlängen-Sortiervorrichtungen erzeugt werden können. Im allgemeinen ist es je höhere Bitraten auftauchen desto leichter, gut funktionierende optische Filter herzustellen.

Die Erfindung ist natürlich nicht beschränkt auf die beschriebenen Ausführungsformen, sondern kann frei variiert werden innerhalb des Umfanges der Patentansprüche. Die Vorrichtung kann beispielsweise angeordnet sein an der Empfängerseite des Übertragungssystems, obwohl sie ebenfalls entlang des Übertragungsabstandes angeordnet sein kann.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung (10; 20) zur Dispersionskompensation in einem faseroptischen Übertragungssystem, wo die Vorrichtung angeordnet ist im Übertragungssystem und wo ein optisches Eingangssignal ( $P_{in}$ ) eingespeist wird an die Vorrichtung (10; 20), dadurch gekennzeichnet, daß die Vorrichtung (10; 20) eine optische Separationsvorrichtung (1; 1') zum spektral-optischen Splitten des optischen Eingangssignals ( $P_{in}$ ) in zumindest zwei Äste in obere und untere Seitenbänder, eine Verzögerungsvorrichtung (4) zum Erhalten einer selektiven Verzögerungszeit der separierten Seitenbänder zur Kompensation der Durchgangszeit-Differenz zwischen den Seitenbändern, welche durch Dispersion verursacht wird, und eine Kombinationsvorrichtung (5; 5') zum Kombinieren der Seitenbänder umfaßt.
2. Vorrichtung (10; 20) in Übereinstimmung mit Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Seitenbänder kohärent kombiniert werden in der Kombinationsvorrichtung (5; 5').



3. Vorrichtung (10; 20) in Übereinstimmung mit Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Verzögerungsvorrichtung (4) zwei einzelne Einzelmode-Wellenleiter umfaßt, worin die Modulations-Seitenbänder mit im wesentlichen der gleichen oder insignifikant variierender Gruppengeschwindigkeit über Distanzen verschiedener Längen propagieren.
4. Vorrichtung in Übereinstimmung mit entweder Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Verzögerungsvorrichtung (4) aus einer faseroptischen Verzögerungsleitung besteht.
5. Vorrichtung in Übereinstimmung mit Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß Vorrichtungen zur aktiven Phasensteuerung angeordnet sind in zumindest einem der Äste zum Erhalten einer kohärenten Signalkombination.
6. Vorrichtung (10) in Übereinstimmung mit einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Separationsvorrichtung (1) einen Fasersplitter (2) und optische Bandpaßfilter (3a, 3b), angeordnet in jedem der Äste und mit einer engen Transferfunktion, umfaßt.
7. Vorrichtung (10) in Übereinstimmung mit Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Fasersplitter (2) aus einem passiven 3-dB-Koppler besteht.
8. Vorrichtung (10) in Übereinstimmung mit einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die eingeschlossenen Komponenten aus diskreten Faserkomponenten bestehen.
9. Vorrichtung in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß sie monolithisch integriert ist auf einem Halbleitersubstrat, beispielsweise GaAs oder InP, oder integriert ist auf Polymer-Materialien oder SiO<sub>2</sub>.
10. Vorrichtung in Übereinstimmung mit einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die optischen Bandpaßfilter (3A, 3B) aus Fabry-Perot-Interferometern zum Ausfiltern der oberen und unteren Seitenbänder bestehen.
11. Vorrichtung in Übereinstimmung mit Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die optischen Bandpaßfilter aus Resonanzlaser-Verstärkerfiltern, wie z. B. DFB oder DBR-Lasern, bestehen.
12. Vorrichtung (20) in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Separationsvorrichtung (11) einen Fasersplitter (2') und eine Wellenlängen-Sortiervorrichtung (6') umfaßt.
13. Vorrichtung (20) in Übereinstimmung mit Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenlängen-Sortiervorrichtung (6') zwei Äste (9', 6') verschiedener Längen (L; L + dL) und einen Richtungskoppler (8), in dem die optischen Signale kombiniert werden, umfaßt.
14. Vorrichtung (20) in Übereinstimmung mit Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenlängen-Sortiervorrichtung (6') aus einem Mach-Zender-Interferometer besteht.
15. Vorrichtung (20) in Übereinstimmung mit Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenlängen-Sortiervorrichtung gitterbasiert ist.
16. Vorrichtung (20) in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 13—15, dadurch gekennzeichnet, daß die Länge des Richtungskopplers (8) gewählt ist als eine Hälfte einer Kopplungslänge.
17. Vorrichtung (20) in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 12—16, dadurch gekennzeichnet, daß die beinhalteten Komponenten aus diskreten Faserkomponenten bestehen.
18. Vorrichtung (20) in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 12—16, dadurch gekennzeichnet, daß sie monolithisch integriert ist auf Halbleitern, wie z. B. GaAs oder InP.
19. Vorrichtung (20) in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 12—16, dadurch gekennzeichnet, daß sie auf Polymer-Materialien oder SiO<sub>2</sub> integriert ist.
20. Vorrichtung (10; 20) in Übereinstimmung mit einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß sie angeordnet ist auf der Empfängerseite des Übertragungssystems.
21. Vorrichtung (10; 20) in Übereinstimmung mit einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß sie eine Erfassungsvorrichtung umfaßt zum Erfassen eines optischen Ausgabesignals (P<sub>out</sub>).
22. Verfahren zur Kompensation der Dispersion in einem faseroptischen Übertragungssystem, wobei die Dispersionskompensation ausgeführt wird in dem faseroptischen Übertragungssystem, an das ein optisches Signal (P<sub>in</sub>) eingespeist wird, dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren die folgenden Schritte umfaßt:
  - das optische Eingabesignal (P<sub>in</sub>) wird aufgeteilt in einer optischen Separationsvorrichtung (1; 11) in ein oberes und ein unteres Modulations-Seitenband,
  - die Modulations-Seitenbänder werden einer selektiven Verzögerung zur Kompensation der Durchgangszeit-Differenz zwischen den Seitenbändern, welche durch die Dispersion verursacht wird, unterworfen,
  - die Seitenbänder werden in einer Kombinationsvorrichtung (5; 5') kombiniert.
23. Verfahren in Übereinstimmung mit Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Modulations-Seitenbänder kohärent kombiniert werden.
24. Verfahren in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 20—21, dadurch gekennzeichnet, daß die Modulations-Seitenbänder über Distanzen verschiedener Längen propagieren, aber mit im wesentlichen der gleichen Gruppengeschwindigkeit.
25. Verfahren in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 20—22, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Eingabesignal (P<sub>in</sub>) in der Separationsvorrichtung (1; 11) geteilt wird, wonach es gefiltert wird zum Erhalten des oberen Modulations-Seitenbandes in einem der Äste und des unteren Modulations-Seitenbandes in dem anderen der Äste.
26. Verfahren in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 20—23, dadurch gekennzeichnet, daß das einkommende optische Signal aufgeteilt wird in zwei Äste, welche von verschiedener Länge sind, wonach das Licht kombiniert wird im Richtungskoppler zum Erzeugen einer Sortierung von Wellenlängen.
27. Verfahren in Übereinstimmung mit einem der Ansprüche 22—25, dadurch gekennzeichnet, daß die Dispersionskompensation ausgeführt wird an der Empfangsseite des Übertragungssystems.

28. Verfahren in Übereinstimmung mit Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Ausgangssignal ( $P_{out}$ ), das von der Kombinationsvorrichtung (5; 5') ausgeht, erfaßt wird durch eine Erfassungsvorrichtung auf eine bekannte Art und Weise.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65



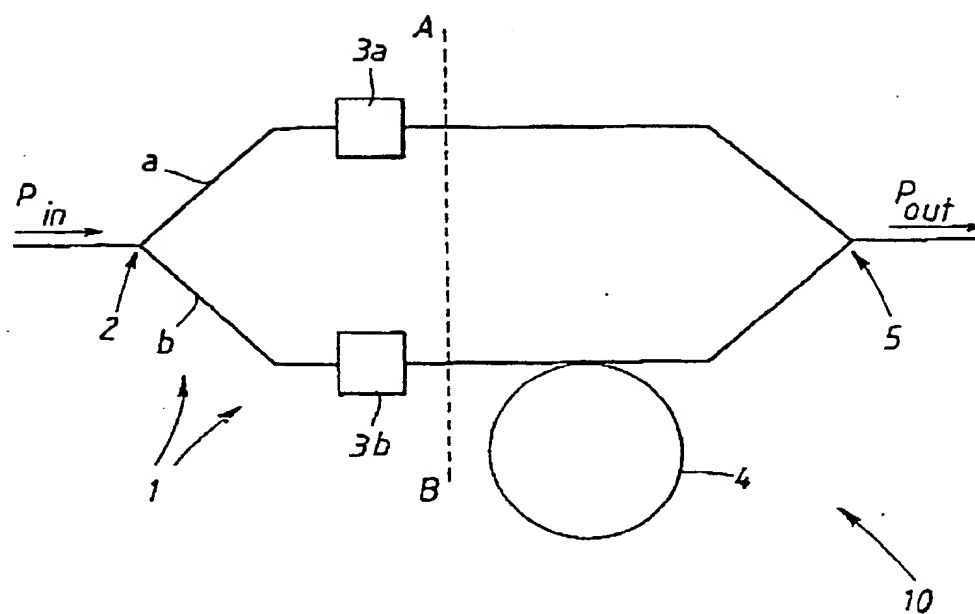


FIG. 1

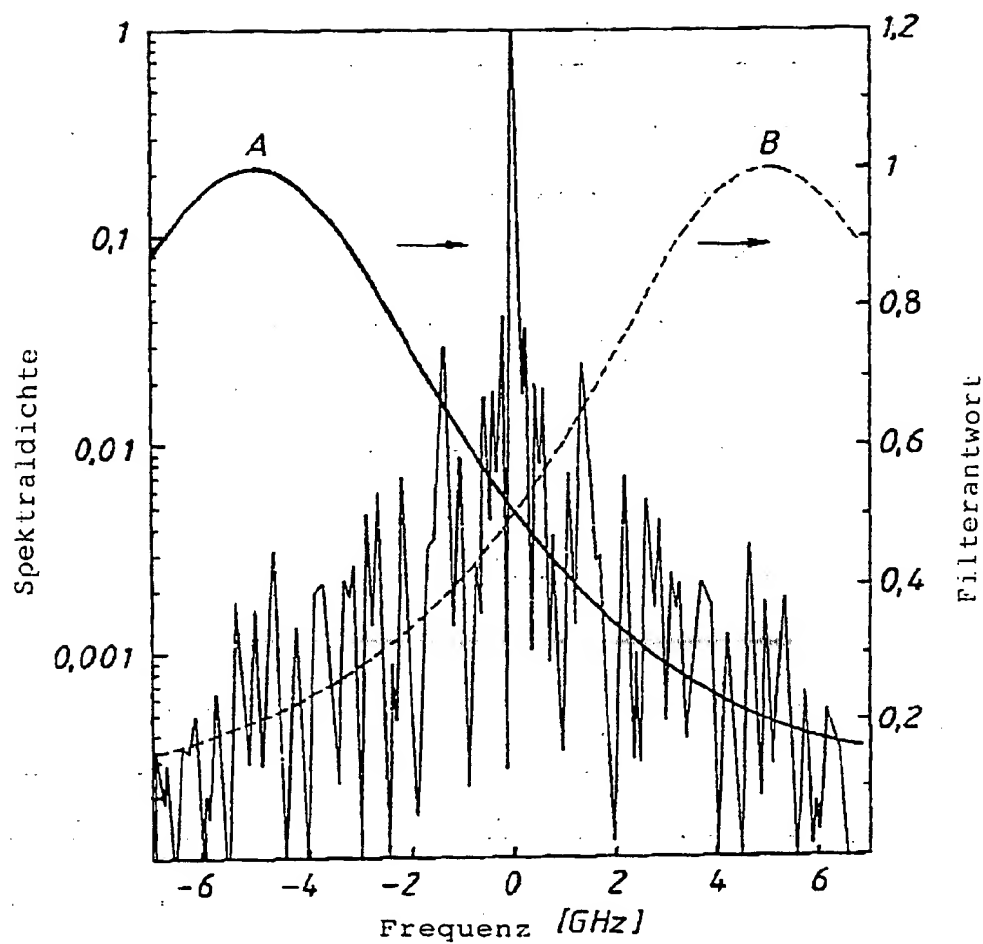


FIG.2

Leistungsstrafe [dB]

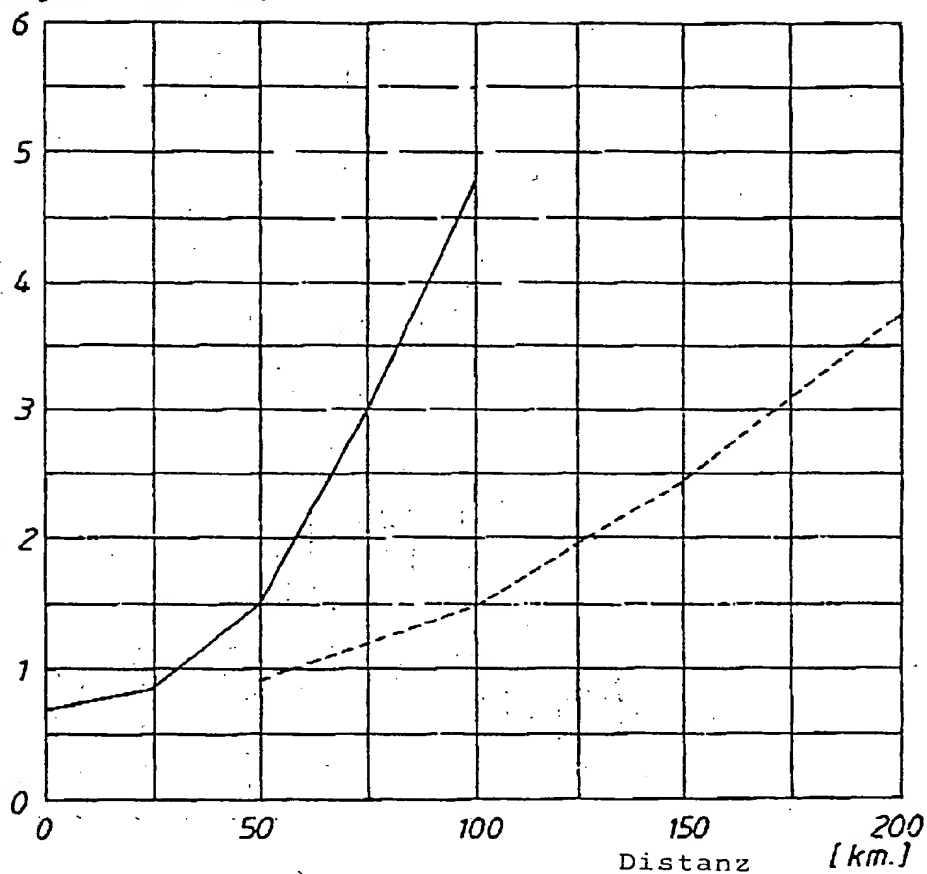


FIG. 3

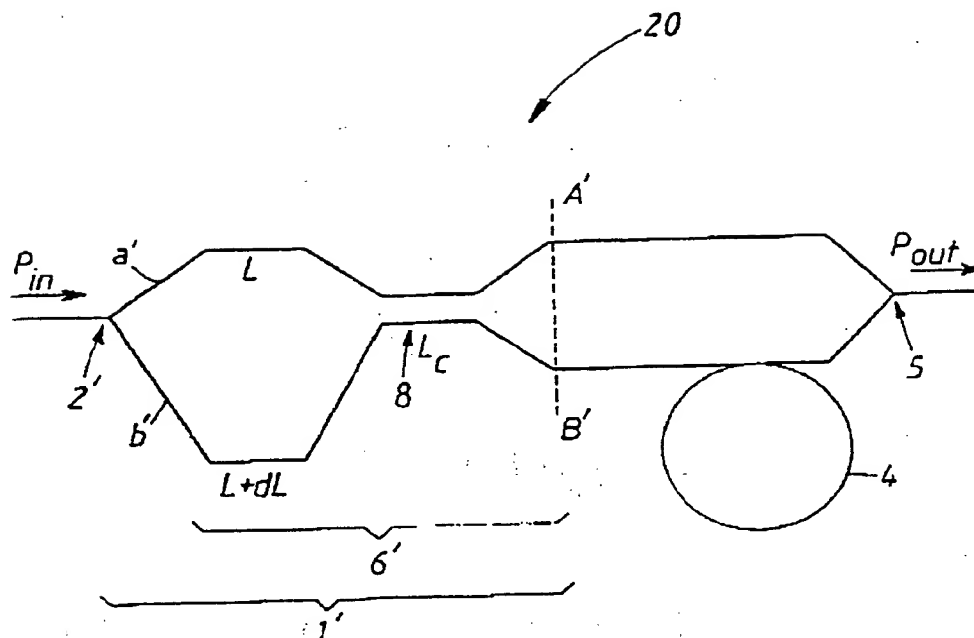


FIG. 4

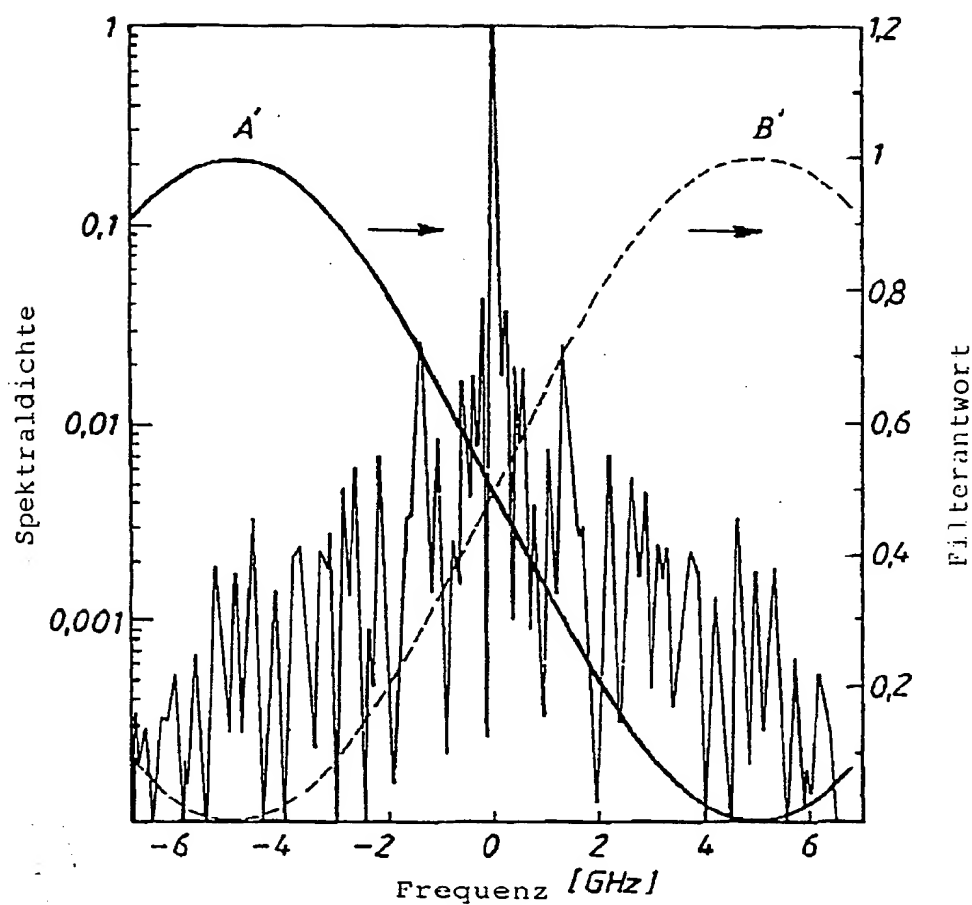


FIG. 5

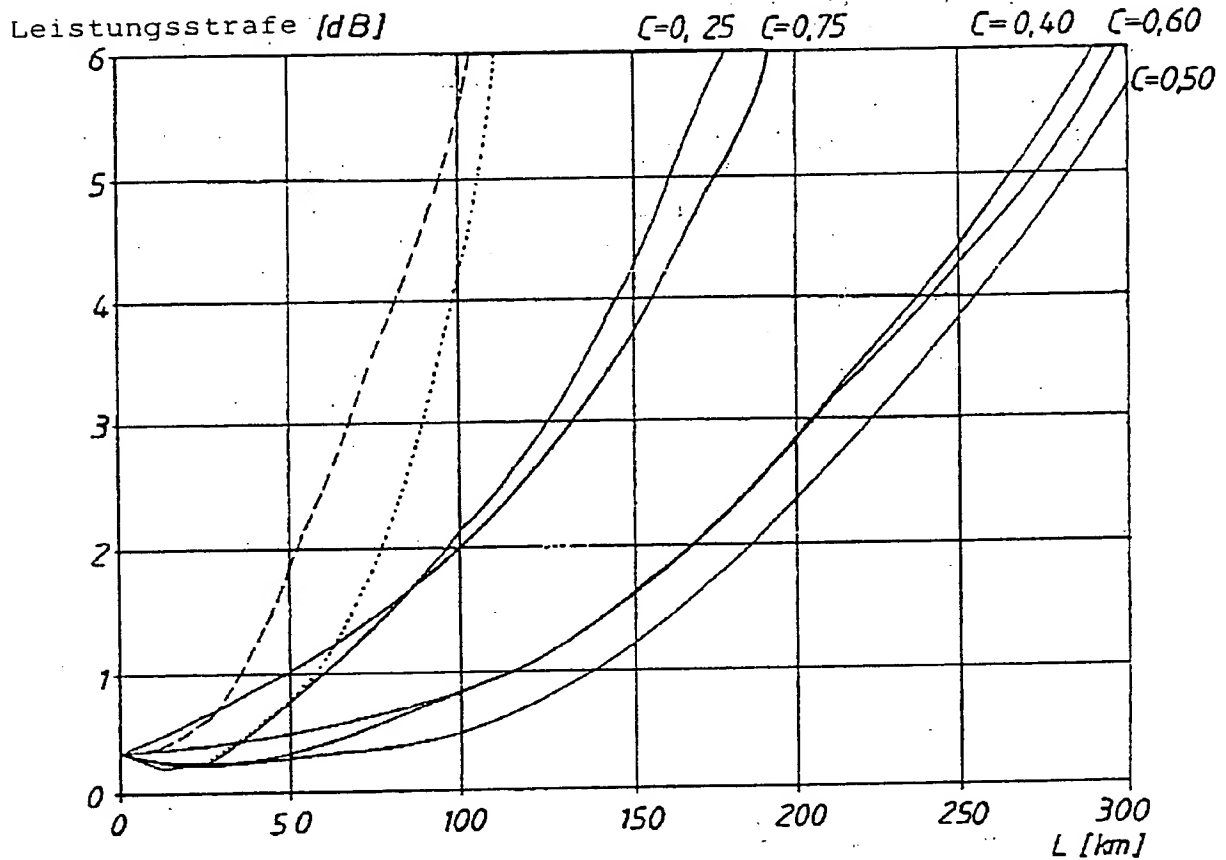


FIG. 6